

# Молекулярная теория трения

Бондарев Олег Викторович  
инженер

Как свидетельствуют различные публикации на тему исследований трения скольжения [1,4; 2,5], явной связи сил и коэффициентов трения с физическими свойствами тел и состоянием их поверхностей установить не удалось. Это позволило сделать вывод, что такая связь отсутствует.

Рассмотрим тела, являющиеся упругими монолитами, имеющие шероховатые поверхности с хаотически выступающими неровностями. Схематично эти поверхности изображены на рис.1.

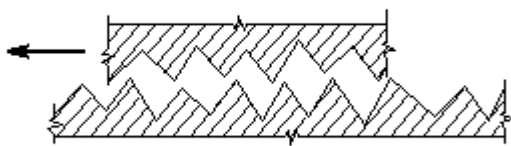


Рис. 1

Из рисунка видно, что для горизонтального перемещения тела в данном случае необходимо приложить силу для его подъема на имеющиеся неровности, пусть микроскопические, но буквально в то же время, затраченная на такой микроподъем энергия, будет возвращена скатыванием в микроскопические углубления. В случае хаотического расположения неровностей на поверхностях в условиях их упругих деформаций, потери энергии, и ее возврат при движении будут происходить фактически одновременно, не требуя приложения силы на перемещение тела. Таким образом, влияния таких шероховатостей на силу трения скольжения нет, такие шероховатости могут влиять только на, так называемую, силу трения покоя, требуя приложения силы в момент начала движения, для первоначального подъема тела на микро выступы.

Как известно [3,207; 3,255; 4,8; 4,45], между всеми молекулами действуют межмолекулярные силы притяжения и отталкивания. Суммарное их действие в зависимости от расстояния между молекулами показано на графике (рис. 2).

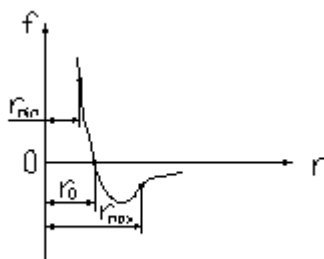


Рис.2

Силы притяжения проявляют себя на всех расстояниях между молекулами и прекращают свое действие лишь на бесконечном удалении молекул друг от друга, а силы отталкивания становятся значительно слабее сил притяжения и практически прекращают проявлять себя на расстояниях более  $r_0$ . Соответственно на расстояниях менее  $r_0$  доминируют силы отталкивания, которые здесь превышают силы притяжения, а на расстоянии  $r = r_0$  силы отталкивания и притяжения равны между собой. Если нет действия внешних сил сжимающих или растягивающих тело, его молекулы

---

за счет имеющейся внутренней энергии колеблются относительно  $r_0$ , при этом расстояние между ними попеременно изменяется от  $r = r_{\min}$  до  $r = r_{\max}$ . В точках  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  кинетическая энергия колебаний равна нулю, а потенциальная максимальна, а в точке  $r = r_0$  наоборот кинетическая энергия максимальна, а потенциальная равна нулю. В случае действия сжимающих внешних сил, центр колебаний смещается в зону  $r < r_0$  (здесь  $r$  — среднее расстояние между молекулами) и действие внешних сил компенсируется внутренними межмолекулярными силами отталкивания. При растяжении центр колебаний смещается в зону  $r > r_0$  и внешним силам противодействуют силы межмолекулярного притяжения.

При рассмотрении действия внешних сил на молекулы можно оперировать смещением  $r$  относительно  $r_0$ , а именно величиной  $Dr=r_0-r$  (1). Для упрощения понимания влияния внешних сил на межмолекулярные силы, можно использовать модель, где между молекулами присутствуют некие межмолекулярные «пружины». Не принимая во внимание амплитуду и частоту имеющихся колебаний молекул под действием тепловой энергии, силу, действующую между молекулами, можно выразить как  $f=k \cdot Dr$  (2), где  $k$  — коэффициент жесткости межмолекулярной пружины. Согласно рис.2 зависимость между  $f$  и  $Dr$  близка к линейной. Значения  $k$  могут быть вычислены для различных материалов, исходя, например, из модулей упругости, если таковые известны, в других случаях могут быть определены экспериментально. Для материалов, у которых усредненное значение  $k$  сильно зависит от температуры (амплитуды колебаний молекул), может быть определен набор коэффициентов  $k$  соответствующих каждый своей температуре.

Так как силы притяжения проявляют себя на расстояниях более  $r_0$  вплоть до бесконечности, то действуя со всех сторон на перемещаемое тело, они, как при его движении, так и в состоянии его покоя, будут уравнивать друг друга, тем самым не создавая никаких препятствий и сопротивлений его перемещению. Таким образом, силы притяжения не являются причиной потерь энергии на трение. На межмолекулярном уровне, если молекулы электрически нейтральны, действуют только силы межмолекулярного притяжения и отталкивания [4, 8,9], следовательно, единственной оставшейся причиной возникновения трения для упругих монолитов являются силы межмолекулярного отталкивания.

Происходит это следующим образом: под действием своего веса или какой-либо другой силы тело прижимается к поверхности, что вызывает некоторую, пусть незначительную, деформацию (появление  $Dr$ ), как между молекулами перемещаемого тела, так и поверхности по которой оно перемещается, расстояние между молекулами становится меньше  $r_0$ , между ними начинают преобладать силы отталкивания.

Если представить ранее предложенную модель, где между молекулами имеются некие «пружины», то в данном случае эти «пружины», пусть на очень малую величину, сжимаются. При перемещении тела относительно поверхности вертикально вверх, перпендикулярно поверхности, межмолекулярные «пружины», разжимаясь, отдают запасенную под силой давления в себе энергию в полезную сторону, внося свой вклад в работу по подъему тела. При горизонтальном же перемещении тела, т. е. при перемещении тела по поверхности (см. рис. 3), «пружины» сжатые перпендикулярно поверхности, распрямляясь, перемещению тела никакой энергии не добавляют, а отдают, запасенную в себе под действием веса тела или другой силы прижимающей тело к поверхности, энергию находящимся на их концах молекулам, повышая их кинетическую энергию и, как следствие, температуру тела и поверхности, увеличивая их амплитуду колебаний. Причина потерь энергии на трение скольжения в том, что при разрыве связи, установленной силами отталкивания, «пружины» крайних молекул, потеряв противодействие, разжимаются в направлении перпендикулярном направлению движения, повышая амплитуду колебаний как самих этих молекул,

так и молекул соседних с ними, повышая тем самым их тепловую энергию.

Определяющим для величины силы трения является взаимодействие молекул находящихся на поверхности тел.

Учитывая сложную структуру веществ тела и поверхности, уместно предположить, что при упомянутой выше деформации будет иметь место сжатие межмолекулярных «пружин», как в вертикальной, так и в горизонтальной (параллельной поверхности перемещения) плоскости, но при перемещении тела равновесие «пружин», сжатых в горизонтальном направлении, не нарушается и сжатие «пружин» со стороны направления движения компенсируется распрямлением «пружин» с противоположной стороны и на увеличение внутренней энергии (температуры тел) они не работают, так как возвращают свою потенциальную энергию сжатых «пружин» на совершение работы по перемещению тела, компенсируя затраты энергии на такое же сжатие таких же пружин с противоположной его стороны.

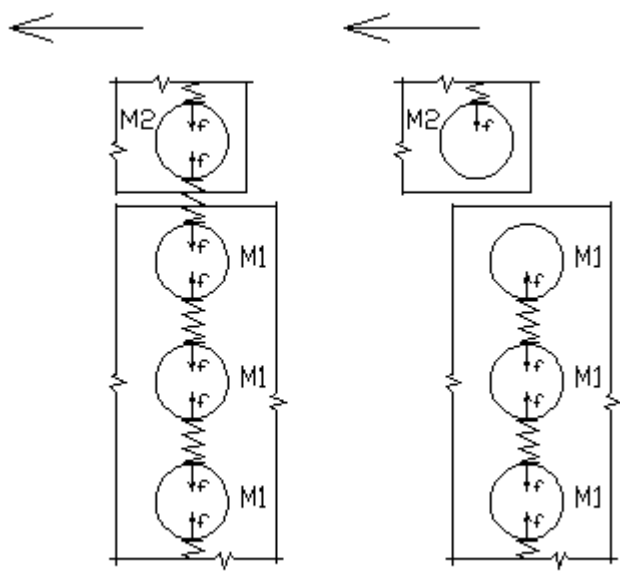


Рис.3

Рис.3

На рис. 3 схематично показаны: M1 — молекулы поверхности по которой происходит перемещение; M2 — молекулы перемещаемого тела.

В случае неупругих деформаций вероятно следует учитывать дополнительные затраты энергии на соответствующие изменения формы тела или структуры вещества. А для сыпучих веществ на перемещаемую массу сыпучего вещества.

Количественное выражение для трения скольжения выведем исходя из работы, затрачиваемой на сжатие межмолекулярных «пружин» в направлении перпендикулярном направлению движения.

Если для определения силы и величины сжатия межмолекулярных «пружин», как было сказано выше, колебания молекул под действием тепловой энергии учитывать необходимости нет, то для определения работы по сжатию межмолекулярных «пружин». важна величина амплитуды этих колебаний. Расстояние между точками  $r_0$  и  $r_{min}$  (см. рис.2) являющееся амплитудой колебаний можно обозначить как  $A_r$ . При сравнительно больших  $A_r$ , имеющих место при наиболее часто встречающихся температурах  $Dr \lll A_r$ , так как сжимающее усилие обычно распределено на очень огромное число молекул. Исходя из того, что колебания являются гармоническими, или, по крайней мере, очень близки к гармоническим, величину увеличения потенциальной энергии молекул

от сжатия внешней силой межмолекулярных «пружин» можно записать, как  $DP_{pot} = F \cdot A_r \cdot 2/p$  (формула 3), где  $F$  - внешняя сжимающая сила. В случаях, когда температура будет близка к абсолютному нулю и  $A_r$  будет очень и очень мала  $A_r \ll \ll Dr$ , будет правильным выражение  $DP_{pot} = F \cdot Dr / 2$  (формула 4).

При перемещении тела на величину  $r_0$  (среднее расстояние между молекулами) вся энергия  $DP_{pot}$  выделится, перейдя в тепловую, так как при таком перемещении разорвутся установившиеся связи («пружинки») между молекулами перемещаемого тела и молекулами поверхности перемещения. Выделившаяся энергия равна работе силы трения. В результате можно записать, что  $f_{тр} \cdot r_0 = DP_{pot1} + DP_{pot2}$ , где  $f_{тр}$  — сила трения;  $DP_{pot1}$  и  $DP_{pot2}$  — приращения внутренней потенциальной энергии соответственно перемещаемого тела и поверхности перемещения, вызванные давлением тела на поверхность. Таким образом, величина силы трения скольжения равна  $f_{тр} = (DP_{pot1} + DP_{pot2}) / r_0$ , а с учетом формулы 3  $f_{тр} = F \cdot (A_{r1} + A_{r2}) \cdot 2/p \cdot r_0$  (формула 5). Выражение  $(A_{r1} + A_{r2}) \cdot 2/p \cdot r_0$  является коэффициентом трения скольжения, т.е.  $k_{тр} = (A_{r1} + A_{r2}) \cdot 2/p \cdot r_0$  (формула 6), величина  $r_0$  должна приниматься наименьшей из двух вариантов (поверхность, тело), при этом для материалов сложной структуры и смешанного химического состава, входящие в формулу 6 величины могут приниматься средневзвешенными с учетом процентного содержания всех компонентов.

Величины  $A_{r1}$  и  $A_{r2}$ , зная величину внутренней энергии приходящейся на одну межмолекулярную «пружину» ( $E_{пр}$ ), можно определить из формулы  $A_r^2 = 2 \cdot E_{пр} \cdot k$  [3, 267; 3,274]

Для случаев, когда справедлива формула 4 сила трения составит  $f_{тр} = F \cdot Dr_{ср} / 2r_0$  (формула 7). Так как величина  $Dr$  в свою очередь зависит от величины сжимающей силы то приходящееся на одну молекулу  $Dr = F / (k_{ж} \cdot N)$ , где  $k_{ж}$  — коэффициент жесткости межмолекулярной «пружины» в области низких температур,  $N$  — количество пар молекул сжимаемых под действием внешней силы. Величина  $Dr_{ср}$  (для формулы 7) будет равна  $Dr_{ср} = F / (k_{ж1} \cdot N_1 + k_{ж2} \cdot N_2) / (k_{ж1} \cdot N_1 \cdot k_{ж2} \cdot N_2)$ . С малой степенью погрешности при определении  $N$  можно учитывать только молекулы находящиеся на поверхностях в пятне контакта тел, фактически важно их соотношение (соотношение плотностей). Для определения силы трения в этом случае будет справедлива формула:  $f_{тр} = F^2 (k_{ж1} \cdot N_1 + k_{ж2} \cdot N_2) / (k_{ж1} \cdot N_1 \cdot k_{ж2} \cdot N_2 \cdot 2r_0)$  (формула 8).  $N$ , как правило, является очень большой величиной, практически стремящейся к бесконечности, и при близких по значению величинах  $N_1$  и  $N_2$  сила  $f_{тр}$  в рассматриваемом случае при росте количества  $N$  стремится к нулю.

При качении также происходит сжатие межмолекулярных «пружин» под действием сил прижимающих тела друг к другу, но в отличие от скольжения энергия этого сжатия почти полностью возвращается перекатываемому телу. При качении молекулы колеса от молекул поверхности отрываются не по циклоиде, чем больше диаметр (радиус) колеса, тем больше в траектории движения молекул (в пределах деформации в месте контакта колеса и поверхности) вертикальной составляющей и меньше составляющей горизонтальной, порождающей трение аналогично скольжению. Таким образом, величина трения качения кроме величины силы  $F$  и коэффициента трения зависит также от диаметра колеса, чем больше диаметр — меньше трение, чем меньше диаметр больше трение. Кроме того, при качении за счет деформации колеса и поверхности, отталкивание молекул колеса от молекул поверхности начинается не в нижней точке циклоиды, где скорость встречи колеса с поверхностью равна нулю, а раньше, где, особенно в случаях больших деформаций, скорость имеет существенную величину, увеличивая прижимающую колесо к поверхности силу и, тем самым, дополнительно потери энергии на трение. Таким образом,

---

трение качения зависит еще и от скорости, чем выше скорость, тем больше потери энергии на трение.

Аналогично рассмотренным выше случаям трения упругих монолитов, от сжатия межмолекулярных «пружин» зависят и величины гидродинамических и аэродинамических сопротивлений, имеющих место в жидких и газообразных средах. В виду обширности материала по этой теме их описание в объем настоящей статьи не вошло.

#### **Литература.**

1. Заднепровский Р. П. Теория трения скольжения. Волгоград; издательство «Офсет». 2005 г.
2. Каржавин В. В., Зимин А. И. Трение, износ и смазочные материалы. Учеб. пособие. Екатеринбург; РГППУ. 2003 г.
3. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том 1. М.; издательство «Наука». 1969 г.
4. Малеев А. В. Лекции по физике твердого тела. Владимир; ВлГУ. 2015 г.